

鐵公路系統氣候變遷脆弱度及 風險地圖之研究¹

VULNERABILITY AND RISK MAPS FOR RAILWAY AND HIGHWAY SYSTEMS

張瓊文 Chiung-Wen Chang²

蕭為元 Wei-Yuan Hsiao³

張益城 Yi-Cheng Chang⁴

謝奇良 Chi-Liang Hsieh⁵

李家齊 Chia-Chi Li⁶

(105 年 8 月 10 日收稿，105 年 12 月 10 日第 1 次修改，105 年 12 月 15 日定稿)

摘 要

鐵公路系統是重要基礎設施，對於國家經濟發展及民眾生活影響甚鉅。然而，氣候變遷衝擊日漸加劇，鐵公路系統受災風險不斷升高，實有必要掌握主要鐵公路系統在氣候變遷下之脆弱度及風險熱點，以利因應氣候變遷之衝擊。本研究參考國內外有關氣候變遷脆弱度及風險評估之文獻與經驗作法，依據 2014 年之「第五次氣候變遷評估報告 (AR5)」定義脆弱度與風險的精神，進行主要鐵公路系統之脆弱度及風險評估。藉由水利署淹水潛勢及中央地質調查所地質災害潛勢等圖資之應用，聚焦於極端降雨，進

-
1. 本文為交通部運輸研究所因應氣候變遷調適議題系列研究階段成果。
 2. 交通部運輸研究所綜合技術組組長（聯絡地址：10548 臺北市松山區敦化北路 240 號 交通部運輸研究所；電話：02-23496877；E-mail: changcwn@iot.gov.tw）。
 3. 交通部運輸研究所綜合技術組副研究員。
 4. 交通部運輸研究所運輸計畫組研究員。
 5. 環興科技股份有限公司氣候變遷組組長。
 6. 環興科技股份有限公司災害管理組組長。

一步建立主要鐵公路系統氣候變遷脆弱度及風險評估指標並產出脆弱度及風險地圖。期有助於相關機關掌握交通部門氣候變遷下調適重要課題並規劃相關作為。

關鍵詞：鐵路；公路；脆弱度；風險地圖；調適

ABSTRACT

The railway and highway systems are essential infrastructure for the national economic development and the people's life. However, the risks of damage to these systems are increasing with the aggravated impacts of climate change. To reduce the impacts on the railway and highway systems, we have to investigate the vulnerability and evaluate the risks caused by climate extreme firstly. This study reviewed domestic and international literatures and experiences relative to the vulnerability and risks of extreme events. According to the concept of vulnerability and risks in the IPCC Fifth Assessment Report (AR5), this study defined the vulnerability and risks of the railway and highway systems to assess impacts and the likelihood of disasters. Then, focused on the extreme rainfall, and used the flood potential maps from Water Resources Agency and the geological hazard potential maps from Central Geological Survey to build vulnerability and risk maps. The results could be good for the authorities of railway and highway systems to master the adaptation issues of climate change and plan the adaptation actions further.

Key Words: Railway; Highway; Vulnerability; Risk map; Adaptation

一、前言

鐵公路系統是國家能維持正常運作最重要的維生基礎設施之一，其不僅與人民日常生活息息相關，亦影響整體經濟的發展。然而，全球因氣候變遷所引起之衝擊（例如暴雨集中、澇災、乾旱、海平面上升等）似有日漸加劇的趨勢，使世界各地鐵公路系統受到災損的風險亦將升高。臺灣每年經常面對梅雨及颱風帶來的豪雨，再加上地形陡峻，河川短促，經常引發嚴重水災及地質災害的情況發生，而這些災害也造成鐵公路中斷，影響社經發展，甚至導致用路人生命財產損失。

然目前國內對於鐵公路系統之氣候變遷脆弱度及風險的掌握，以及未來應投入調適行動的資源規劃等仍需加強，因此，有必要以系統性、客觀性的科學分析方式，評估可能造成災害的風險與影響程度，以利研擬調適策略，進行有效的氣候變遷調適作為，提升在氣候變遷下之調適能力，以維持應有的運作功能及減少對社會之衝擊。

交通部運輸研究所（以下簡稱運研所）自 101 年起開始進行有關氣候變遷與運輸系統

關聯的系列研究，整體研究參考國內外有關氣候變遷脆弱度及風險評估之研究文獻與經驗作法，聚焦於對重大鐵公路系統衝擊較大之氣候變遷影響因子—「降雨型態改變」（含極端強降雨及颱風），進行鐵公路系統脆弱度及風險分析；藉由鐵公路系統氣候變遷脆弱度評估指標之研析，建立脆弱度及風險地圖。本文為運研所系列研究的階段性成果，可作為鐵公路相關主管機關進一步研提氣候變遷調適行動方案與行動計畫之參據。

二、國內外文獻回顧

2.1 國外文獻

聯合國政府間氣候變遷專家小組 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 2007 年出版之「第 4 次氣候變遷評估報告 (AR4)」^[1] 為了解氣候變遷之影響，AR4 第 2 工作小組於評估報告中探討氣候變遷對自然系統、人工管理系統及人類系統的影響，以及這些系統的調適能力及其脆弱度。其中「調適能力」(adaptive capacity) 係指某個系統針對氣候變化 (包括氣候變遷及極端事件) 中的潛在損害所具有的自我調節能力；「脆弱度」(Vulnerability) 係指某個系統容易受到氣候變遷 (包括氣候的變異性及極端情境) 負面影響及無法應對程度。脆弱度與該系統暴露所在之氣候變化特性、強度及頻率，以及系統本身之敏感度及調適能力有關。此外，在第 2 工作小組報告執行摘要 (executive summary) 中提到：「氣候變遷下的脆弱度，是用來描述系統受到有害的衝擊影響並且無法處理有害衝擊的程度等級；至於風險的概念，則是結合了衝擊發生的機率值、氣候變遷所造成的不確定性、暴露程度以及調適能力」。民國 102 年運研所綜整 IPCC 提出相關脆弱度說明描述，脆弱度可以暴露度、敏感度及調適能力的綜合函數表示^[2]如下：

$$Vulnerability = f \times (Exposure, Sensitivity, Adaptive Capacity)$$

聯合國環境規劃署 (UNEP) 於 2009 年 11 月提出之報告^[3] 亦指出：氣候變遷下的脆弱度，係指一個系統容易受到或無力因應氣候變遷 (包括氣候變異及極端氣候) 的不利影響，其為系統的暴露、人類的敏感度及其調適能力的函數。暴露度可指如乾旱、衝突或極端價格波動等危害，而脆弱度影響的嚴重性不僅取決於暴露度，同時也包含暴露單元之敏感度 (如一個生態系統、分水嶺、島嶼、家庭、城市或國家等敏感度)，以及對抗或調適的能力。脆弱度的概念是傳統風險分析的重要延伸，且著重在自然危害。

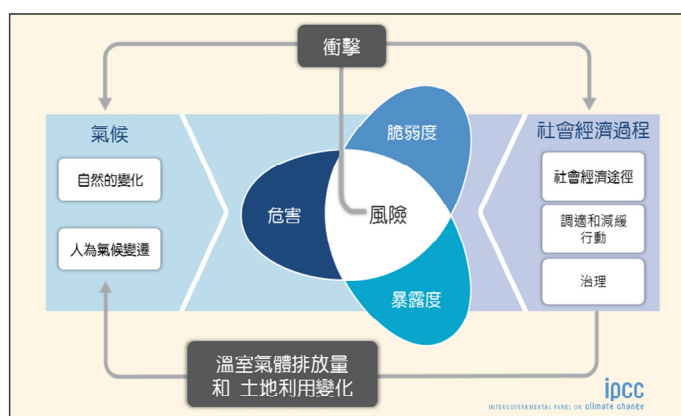
Lee 等人^[4] 於 2012 年針對韓國地區進行氣候變遷下之脆弱度評估，將脆弱度以氣候暴露度、敏感度及調適能力之函數表示，關係如下：

$$脆弱度 = \alpha \times 氣候暴露度 + \beta \times 敏感度 - \gamma \times 調適能力$$

α 、 β 及 γ 分別為暴露度、敏感度及調適能力之權重因子，相關定義分述如下：(1) 暴露度係指氣候變遷衝擊，如：溫度及降雨；(2) 敏感度係指氣候變遷衝擊範圍，如：坡度、

土壤狀態；(3) 調適能力係指氣候變遷衝擊降低，如：財務支援。

2014 年 IPCC 於「第 5 次氣候變遷評估報告 (AR5)」之第 2 工作小組報告^[5]，將風險納入 AR5 核心概念中，認為與氣候相關影響的風險來自於氣候相關危害（包含危害性事件與趨勢）、暴露度與脆弱度相互作用。在定義上，「風險」係指氣候變遷影響下造成有價值的事物處於險境，以及結果的不確定性，通常來自於「脆弱度」、「暴露度」及「危害度」的相互作用，如圖 1 所示，定義為「 $風險 = f(脆弱度, 暴露度, 危害度)$ 」， $脆弱度 = f(敏感度, 調適能力)$ 」，表述方式通常為危害性事件或趨勢發生的概率，乘以這些事件或趨勢發生造成的後果。「危害度」係指自然發生或是人類引發的事件、趨勢或是物理性衝擊，可能危害生命或影響健康，以及損害財產、基礎建設、生計、服務與環境資源。「脆弱度」係指易受到不利影響的傾向或素質，其包括對於損害的敏感與感受性以及缺乏應對或適應的能力。「暴露度」係指人類生命及其生計、環境服務及資源、基礎建設、或經濟、社會及文化資產處於可能受到不利影響的地方。



資料來源：IPCC^[5]。

圖 1 IPCCWGII AR5 核心概念示意圖

比較 IPCC 第 4 次報告與第 5 次報告針對「脆弱度」及「風險」定義之差異，第 5 次報告已經將主要重點從「脆弱度」改為「風險」，認為風險來自脆弱度、暴露度及危害度間的相互作用。

風險評估方式種類繁多，因定義不同，而有不同的評估計算方式。例如 2004 年聯合國國際減災組織 (United Nations International Strategy for Disaster Reduction, UNISDR)^[6] 提出了「 $風險 (risk) = 危害度 (hazard) \times 脆弱度 (vulnerability)$ 」的模式。各指標定義上，風險係指危害事件發生的後果及預期損失（如死亡、受傷、財產、生計、經濟活動阻斷或環境破壞）之機率；危害度係指潛在危害事件、現象或人類活動可能造成生命損失、受傷、財產損害、擾亂社會及經濟，以及環境破壞，危害度特點包含其所在位置、強度、頻率及

機率；脆弱度係暴露範圍之敏感程度，包含物理因子、社會因子、經濟因子及環境因子之交交互作用。

Villagrán De León^[7] 於 2006 年提出另一個模式：「 $\text{風險} = (\text{危害度} \times \text{脆弱度}) / \text{因應能力}$ (coping capacity)」的概念，亦為許多研究者所採納，其中因應能力係指由人或組織透過現有資源及能力以因應災害帶來的不良後果。Webb 與 Harinarayan^[8] 1999 年提出「 $V(\text{脆弱度}) = H(\text{危害風險}) - C(\text{因應能力})$ 」來評估身體健康與營養不良問題，脆弱度是危害風險 (hazardous risk) 與因應能力 (capacity for coping) 的綜合結果，當營養不良的威脅越高而應對能力越低時，身體的脆弱度也將隨之增高。Dilley 等人^[9] 2005 年提出「風險」是「危害度」、「暴露」與「脆弱度」3 個元素的組合，其關係為「 $\text{風險} = \text{危害度} \times \text{暴露} \times \text{脆弱度}$ 」。Hahn^[10] 2003 年則是採用「危害度」、「暴露」、「脆弱度」與「因應能力」等 4 個元素發展出「 $\text{風險} = \text{危害度} + \text{暴露} + \text{脆弱度} - \text{因應能力}$ 」的評估模式。

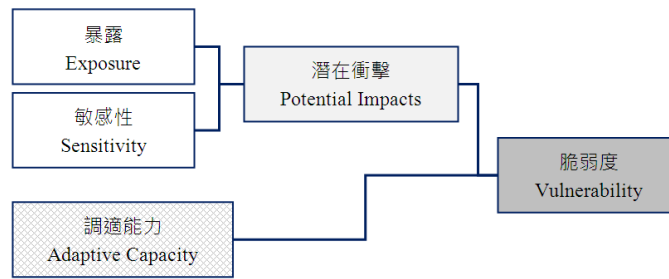
2.2 國內文獻

在「國家氣候變遷調適行動計畫—維生基礎設施領域行動方案 (102~106 年)」中^[11]，也將「脆弱度」以系統在氣候變遷衝擊下的暴露度、敏感度及適應力三者的綜合值表示，另指出若要降低或改善氣候變遷對系統的脆弱度，需針對暴露度、敏感度及適應力各別找出造成其值太高或太低的原因，以作為調適課題，並進一步找出結果產出的作用機制或關鍵因素，據以擬訂具體可行且有效的調適措施。有關暴露度、敏感度及調適力之相關說明略述如下：(1) 暴露度係指設施或系統受氣候變遷直接影響的範圍；(2) 敏感度係指設施或系統損壞導致傷害、人員傷亡、單位無法運作、經濟損失或民生衝擊之影響，在某些情況下可代表該設施／系統之重要性；(3) 適應力係指設施或系統抵禦、承受及容納衝擊與復原的能力。

行政院農業委員會民國 99 年曾針對氣候變遷對灌溉系統之衝擊與脆弱度評估方法進行探討^[12]，包括灌溉系統脆弱度之定義、脆弱度評估指標選定，以及氣候變遷對農業灌溉用水量之影響評估工具建立。該研究採用： $\text{脆弱度} = f(\text{衝擊量}, \text{調適策略}, \text{暴露量})$ ，即脆弱度為衝擊、調適策略及暴露量之函數。

國家發展委員會於民國 101 年「地方氣候變遷調適計畫規劃作業指引」報告中^[13]，提及脆弱度是指某一領域對於氣候變遷之暴露、敏感性、調適能力的綜合性函數，如圖 2 所示。評估各領域氣候變遷脆弱度的工作包括：評估地方各領域的氣候變遷暴露程度、評估特定領域對於氣候變遷衝擊的敏感性、分析領域的氣候變遷潛在衝擊、評估領域容納或因應氣候變遷衝擊的能力。透過上述 3 項評估工作，整合分析出特定領域的脆弱程度。

交通部運輸研究所民國 104 年「重大鐵公路系統氣候變遷調適策略與脆弱度評估指標之研究」^[14]，亦採用前述脆弱度評估概念；惟於民國 105 年「重大鐵公路系統氣候變遷風險評估機制與調適資訊平台之研究 (1/2)」中^[15]，為進一步透過「 $\text{風險} = \text{危害度} \times \text{脆弱度}$ 」公式評估風險等級時，考量可蒐集資料的特性，脆弱度之定義已參考 IPCC AR5 的風險、脆弱度與暴露度關係，調整為不同的定義。



資料來源：國家發展委員會^[13]。

圖 2 脆弱度評估架構圖

經濟部水利署為加值既有淹水潛勢圖資料庫，民國 99 年建立了臺灣地區對淹水災害脆弱度與風險地圖的分析方法^[16]，即採用此種風險分析概念建立風險評估模式為： $Risk$ (淹水風險) = $Hazard$ (淹水危險度) \times $Vulnerability$ (淹水脆弱度)；其中淹水危險度，係指淹水過程中諸多可能造成危險之因子總合指標，如淹水深度、水流流速、水位上升速率...等；淹水脆弱度係指暴露於淹水災害中的對象，其易受影響的程度，包含人類傷害和財產破壞；淹水風險係指受淹水危險威脅衝擊而引致預期損失或損害（生命、人受傷、財產受損、經濟活動中斷等）。淹水風險度之計算，係將淹水風險度及淹水脆弱度進行相乘，但在結果呈現時，該計畫建議以半定量矩陣作為風險分析之依據。

行政院農業委員會林務局民國 102 年「建立氣候變遷對生物多樣性風險與脆弱度評估模式及因應策略規劃」針對物種進行滅絕風險評估^[17]，亦以「 $風險(risk) = 危險度(hazard) \times 脆弱度(vulnerability)$ 」之方式進行風險分析。該計畫對於評估對象有完整資料或無完整資料採不同評估方法；對於具有較完整資料可供評估之對象部分，危險度分析主要考量自然因素（如坡地災害、淹水、外來種等）與社會因素（如道路密度）等衝擊因子；脆弱度主要是依據物種分布模式分析成果以及保護區氣候變化資料為基礎，進行脆弱度評估。綜合物種在未來情境的脆弱度、未來自然及人為危險度的影響下，進行物種在未來氣候情境下的定量風險評估。另對於目前缺乏足夠資料進行脆弱度及危險度評估之對象部分，則利用定性的氣候變遷衝擊矩陣進行風險評估，其將評估對象的未來脆弱度，定義為未來氣候變遷衝擊之「後果」，包括「敏感度」（受影響的幅度）、「暴露度」（受影響的範圍或數量）以及「調適能力」（受影響後的回復能力）的綜合表現，例如高脆弱度係指在氣候變遷主要衝擊下，受影響的幅度與範圍或數量顯著增加，且目前尚未進行調適措施，回復能力有待強化；危險度定義為顯示氣候變遷造成顯著衝擊的「可能性」。透過氣候變遷衝擊矩陣的對應（如圖 3 所示），將 9 種可能定性分為高、中、低 3 級，並完成定性風險評估。

黃宗煌等人民國 101 年「能源部門因應氣候變遷調適策略研析計畫」進行能源供給設施風險評估^[18]，主要在了解目標設施對於特定氣候衝擊因子的風險程度與成因，識別系統脆弱環節，並據此研析因應的調適策略／措施，降低設施風險，增強系統氣候耐災力。該計畫選用 $風險(risk) = 危害度(hazard) \times 脆弱度(vulnerability)$ 之方式進行分析，危害度

風險		危險度		
		高	中	低
脆弱度	高	高	高	中
	中	高	中	低
	低	中	低	低

資料來源：行政院農業委員會林務局^[17]。

圖 3 林務局風險評估矩陣

及脆弱度定義如下：

$$\text{危害度} = k_1 \times \text{受災機率等級} + k_2 \times \text{受災次數等級}$$

$$\text{脆弱度} = w_1 \times \text{暴露度等級} + w_2 \times \text{敏感度等級} + w_3 \times \text{調適能力等級}$$

式中， k_1 、 k_2 、 w_1 、 w_2 、 w_3 為權重係數， k_1 與 k_2 及 w_1 、 w_2 與 w_3 個別總合皆為 1。

式中之暴露度、敏感度和調適能力之等級，是對照等級表獲得，權重係數則由專家問卷調查所得。獲得危害度與脆弱度數值後，即可利用風險矩陣（5×5）與風險分級表進行風險之判斷。

國家災害防救科技中心^[19]民國 103 年以臺灣氣候變遷推估資料，分析氣候變遷衝擊下之淹水、坡地、海岸與乾旱等 4 種災害之風險，並藉由風險評估流程繪製 4 種災害風險圖，提供基期及氣候變遷衝擊（含近未來與世紀末 2 個推估時期）下，不同災害風險圖在熱點區域空間上的變化。該研究風險圖指標評估方法亦以危害度與脆弱度相乘定義風險，其中「風險」是針對氣候變遷衝擊對自然系統與人類社會經濟系統造成的可能損害程度；「危害度」主要考量氣候變遷導致之氣候特性變化衝擊，而該研究主要考量降雨因素造成之自然危害；「脆弱度」則是定義系統面臨氣候變遷危害所造成的衝擊，考量環境脆弱度與社經脆弱度，以災害潛勢表示環境脆弱度，社經脆弱度則以人口、社經發展與產值等表示。之後分別計算各指標等級，再以等權重方式，將危害、環境脆弱與社經脆弱度三面向指標相乘，以獲得各災害風險值，而後將風險值再劃分為 5 個等級，並以風險圖呈現，等級越高，災害風險越高。

經濟部水利署水利規劃試驗所於民國 102 年「高屏流域因應氣候變遷防洪及土砂更新研究計畫」中^[20]，在防洪設施風險評估部分，以 $Risk$ （風險）= $Hazard$ （危險度）× $Vulnerability$ （脆弱度）之概念，計算出防洪設施風險評估結果。但考量風險量化過程中，將有資料蒐集無法完善或技術上無法精確估算的限制，因此其量化後之數據便存在著相當的不確定性。該研究可快速找出風險因素的所屬區域及快速辨別風險因素的嚴重性，因此採用「風險矩陣」（如圖 4）排列風險因素之特性，以表現不同程度之風險，最後再以 GIS 軟體完成防洪設施風險地圖。

矩陣		危險度				
		非常高	高	中	低	非常低
脆弱度	非常高	非常高	非常高	高	高	中
	高	非常高	高	中	中	低
	中	高	中	中	中	低
	低	高	中	中	低	非常低
	非常低	中	低	低	非常低	非常低

資料來源：經濟部水利署水利規劃試驗所^[20]。

圖 4 水利規劃試驗所風險矩陣

有關「脆弱度」與「風險評估」方面，目前以 2004 年聯合國國際減災組織 (UNISDR) 提出之「 $風險 = 危害度 \times 脆弱度$ 」較廣為國內相關政府單位進行氣候變遷風險評估使用；該模式將暴露度之概念納於危害度與脆弱度之中。

目前我國各項鐵路系統轄管機關，多採防災角度進行短期之災害（風險）管理，而本研究之功能主要為進行氣候變遷下的中長期規劃，期能協助研判未來災害發生的熱點，並輔助災後復原規劃。

2.3 小結

透過文獻探討可發現，探討氣候變遷對自然系統、人工管理系統及人類系統的影響及因應作為，首先要分析系統受災的脆弱度或風險，方可透過系統的調適策略來改善脆弱度並降低風險。近幾年來，脆弱度及風險評估與應用持續發展中，雖然概念上都相當類似，但實際上的定義，隨著系統特性與資料性質的不同亦有差異，且因定義不同，實質的評估計算方式亦有所差異。

三、研究方法

本研究之研究範疇、情境、脆弱度與風險評估模式及各項指標定義分別說明如下：

3.1 範疇界定

本研究所指之鐵、公路系統，係涵蓋國道、省道快速公路、一般省道、臺鐵主線（不含支線），以及高鐵（7 車站）等 5 部分。

3.2 情境設定

綜合考量臺灣氣候狀況，目前「氣溫上升」及「海平面上升」對鐵公路系統影響較有限，而「降雨型態改變」（含極端強降雨及颱風）則明顯對鐵公路系統之衝擊較大。另依據國道、省道、臺鐵及高鐵之歷史災點紀錄得知，氣候變遷對國內交通系統之衝擊，主要是颱風所帶來的豪雨為主。因此，本研究針對「降雨型態改變」影響重大鐵公路系統服務功能，對社會、經濟及交通運輸可能受影響之範圍與程度，以及藉由預防、預警、應變及復原等調適作為來降低影響程度等條件，進行鐵公路系統脆弱度及風險評估。

在雨量情境設定上，本研究採用國家災害防救科技中心 (NCDR) 所執行之臺灣氣候變遷推估與資訊平台建置計畫 (TCCIP) 之統計降尺度研究成果^[21]，故基期 (1980~1999 年) 與目標年 (2020 年~2039 年) 設定與其一致。搭配不同頻率分析重現年期，以 (1) 基期 1980~1999 年、200 年重現年及 (2) 氣候變遷情境 (IPCC AR4 A1B 情境) 2020~2039 年、200 年重現年的降雨資料，分別分析現況及未來年脆弱度及風險。

3.3 脆弱度與風險評估模式

本研究採用 $\text{風險} = f(\text{脆弱度}, \text{危害度})$ 的概念，進行鐵公路系統中斷的風險評估，評估方式如圖 5 所示。

在危害度部分，考量淹水與坡地災害兩種危害類型；脆弱度方面，則考量社經影響程度 (含產值、系統運輸日交通量或乘客數) 及運輸設施現有功能 (含結構安全性、監測系統、替代道路數) 等兩大類脆弱度指標；並利用風險矩陣進行風險等級劃分，主要劃分為高、中高、中、中低及低風險等 5 個等級。

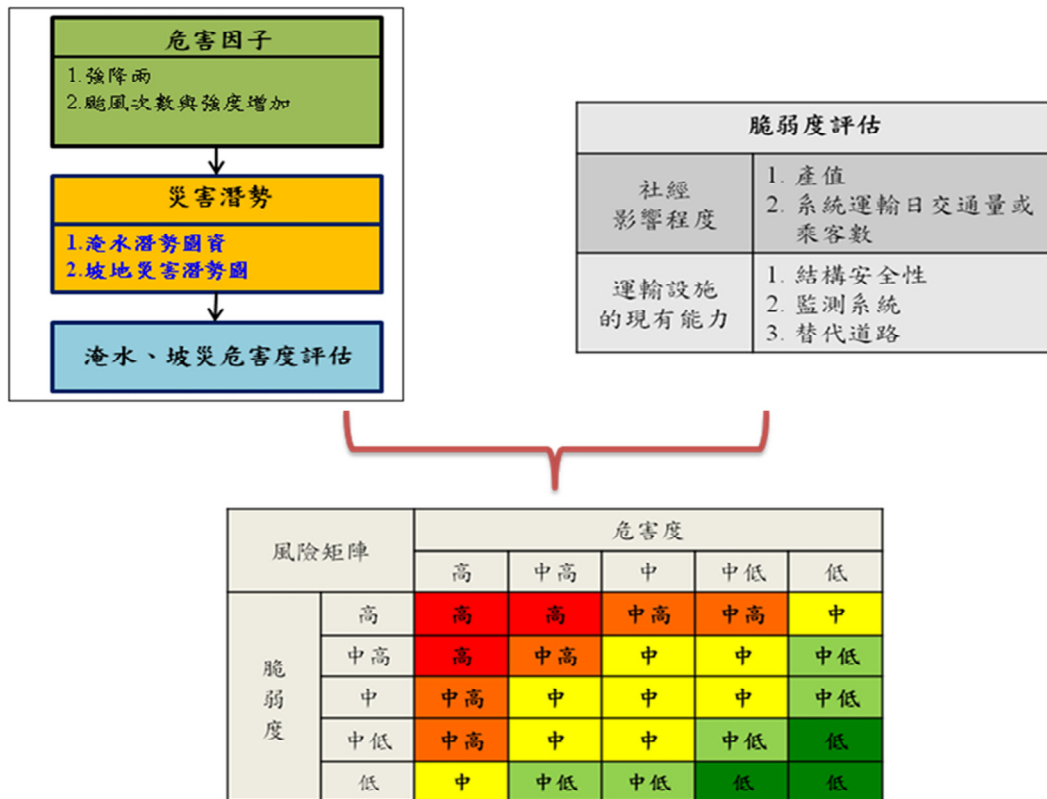
3.4 指標名詞定義及說明

3.4.1 脆弱度

定義為運輸系統服務受氣候變遷負面影響的傾向與本質，包括敏感性、容易受災特性，以及目前應付與適應的能力。由於本研究目的希望反映運輸服務中斷對社經影響造成之負面衝擊，進一步將脆弱度定義為社經影響程度與運輸設施的現有功能之函數。

在社經影響部分，考量運輸系統服務中斷，最直接影響的是系統本身所應負擔的運輸功能，其次為對運輸系統行經地區的經濟活動影響，因此從「交通需求」與「經濟發展」兩層面著手，經研討評估後，各挑選出一項作為代表性評估指標；在「交通需求」面採「日交通量或乘客數」評估指標、「經濟發展」面採各鄉鎮「產值」評估指標。在運輸設施的現有功能部分，綜合考量資料蒐集問題，從災前的「預防能力」、「預警能力」及災時的「應變能力」層面，各挑選出一項作為代表性評估指標，其中「預防能力」面採「結構安全性」評估指標、「預警能力」面採「監測系統」評估指標、「應變能力」面則採「替代道路」評估指標。

5 項評估指標多劃分為 5 個等級，分屬於高、中高、中、中低、低度脆弱度等級，其相對應的分數為 5、4、3、2、1 分。脆弱度計算方式為先對社經影響程度兩項評估指標取平均值，同時對運輸設施的現有能力的 3 項評估指標取平均值，再對前述所得兩數值取平均(四捨五入計算) 即可。各評估指標分級說明如下：



資料來源：交通部運輸研究所^[15]、本研究整理。

圖 5 鐵公路系統的中斷風險評估

1. 「日交通量或每日乘客數」評估指標

公路與軌道系統於營運特性上有所差異，故指標選擇上公路系統為路段日交通量(PCU，小客車當量)，軌道系統則為站間日乘客數(人次)。現況資料係採 103 年實際觀測值，未來年交通量則引用運研所預測之民國 120 年交通量進行分析^[22]。

評估指標等級分為 5 級，當重大鐵公路系統日交通量、乘客數越多時，即代表鐵公路系統受到氣候變遷影響而導致損壞或失能時，受到影響越大，敏感度等級亦越高。分級上係考量交通量、乘客數之「離散程度」，先界定高、低兩級，再以高低兩級之中位數作為中等影響參考值，結合「筆數均等」概念及微調分級，區分中高、中、中低等級(詳表 1)。

表 1 日交通量、乘客數等級界定

脆弱度	高 鐵 站間日搭乘人數	臺 鐵 站間日搭乘人數	國 道 日交通量 (PCU)	快速公路 日交通量 (PCU)	省 道 日交通量 (PCU)
高	>7 萬	>5 萬	>10 萬	>10 萬	>10 萬
中高	5 萬<X≤7 萬	2.5 萬<X≤5 萬	5 萬<X≤10 萬	5 萬<X≤10 萬	2.5 萬<X≤10 萬
中	3 萬<X≤5 萬	1.5 萬<X≤2.5 萬	2.5 萬<X≤5 萬	2.5 萬<X≤5 萬	1 萬<X≤2.5 萬
中低	1 萬<X≤3 萬	5 千<X≤1.5 萬	1 萬<X≤2.5 萬	1 萬<X≤2.5 萬	5 千<X≤1 萬
低	≤1.5 萬	≤5 千	≤1 萬	≤1 萬	≤5 千

資料來源：交通部運輸研究所^[15]、本研究整理。

2. 「產值」評估指標

由行政院主計總處「100 年工商及服務業普查」之鄉鎮市區統計資料－生產總額所得。因無法預測未來年的產值，故採用相同圖資，其分級方式係以分位數法劃分 5 級。

表 2 產值等級界定

脆弱度	低	中低	中	中高	高
產值 (千元)	≤ 1,909,354	1,909,354<X≤ 7,701,821	7,701,821 <X≤ 25,671,903	25,671,903 <X≤ 84,476,357	>84,476,357

資料來源：交通部運輸研究所^[15]、本研究整理。

3. 「結構安全性」評估指標

此項指標主要係反映系統本身的能力，受限於資料，本階段研究先以目前評估最完整之橋梁安全程度來代表。分為安全度屬中度（橋梁安全分數 90~100 分或無橋梁路段者）、安全度中低（80~90 分）以及安全度低（80 分以下）等 3 級。

4. 「監測系統」評估指標

此項評估指標，主要係反映系統之災害預警能力，以鐵公路系統之評估路段有無監測系統來衡量。一般監測系統之監測範圍最廣為半徑 50 公尺（直徑 100 公尺），因此將鐵公路系統中，有監測系統之路段的影響半徑（50 公尺）內路段，設定為預警能力屬中高度（表該路段有預警能力）；其餘路段則設為預警能力屬中度（表該路段沒有預警能力）。

5. 「替代運輸」評估指標

此項指標主要反映應變能力，以鐵公路系統災時／災後阻斷時，服務範圍內之替代道路數，作為應變能力的評估重點。各系統分別說明如下：

- (1) 公路系統：國快速道為封閉式道路，需藉由交流道出入，考量既有國道系統交流道間之平均間距約 10 公里，因此，設定服務半徑為 5 公里。而一般省道系統主要服務沿線鄉鎮之短程城際旅次，平均長度約 5 公里，將省道服務半徑設定為道路兩側 2.5 公里。
- (2) 軌道系統：以系統平均站距作為車站服務範圍之依據。高鐵路線全長 345 公里，除臺北都會區內車站距離較近（現況兩處車站、未來 3 處），其他車站間距約 50 公里，設定服務半徑為 25 公里。臺鐵營運路線長 1,085 公里，車站 220 座，平均站距約 5 公里，設定車站服務半徑為 2.5 公里。

利用地理資訊系統技術，考量各運輸系統服務特性，以功能相近之道路作為替代道路之選擇對象，分析各系統服務範圍內之替代道路數。此項指標之評估等級分為 5 級，詳如表 3。

表 3 替代道路數等級界定

脆弱度	高鐵	臺鐵	國道及快速公路	省道
高	≤ 5	≤ 2	≤ 1	≤ 1
中高	$5 < X \leq 8$	$2 < X \leq 4$	$1 < X \leq 3$	$1 < X \leq 3$
中	$8 < X \leq 10$	$4 < X \leq 7$	$3 < X \leq 5$	$3 < X \leq 5$
中低	$10 < X \leq 13$	$7 < X \leq 10$	$5 < X \leq 8$	$5 < X \leq 8$
低	> 13	> 10	> 8	> 8

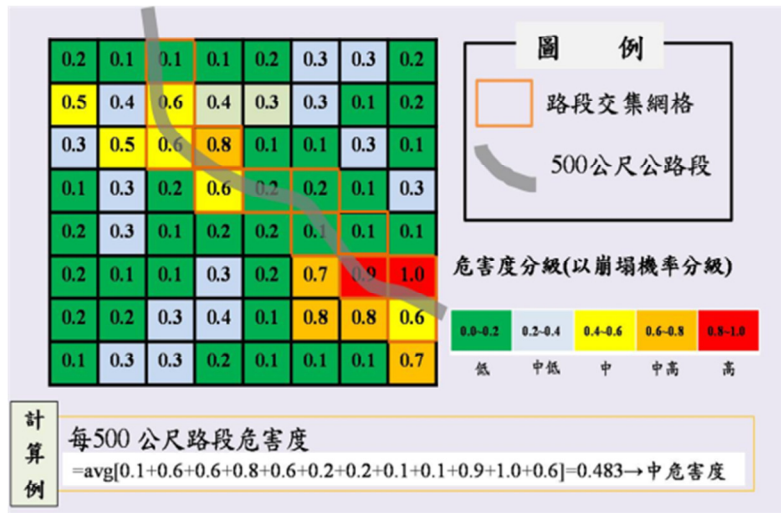
資料來源：交通部運輸研究所^[15]、本研究整理。

3.4.2 危害度

定義為「氣候變遷引起之災害對鐵公路系統產生衝擊之失能機率或程度」，考量災害特質不同，分為坡災及淹水危害度加以說明。

3.4.2.1 坡災危害度

根據運研所系列研究建立之強降雨事件山崩潛感評估模式^[15]，用以評估因不同降雨情境所導致之邊坡崩塌機率。以省道為例，基於前述全臺網格單元崩塌機率模式，套疊全臺省道公路路網圖，評估省道公路沿線每 500 公尺之路段崩塌機率平均值，此平均崩塌機率即為省道公路之危害度，分析方式及危害度分級示意如圖 6 所示。



資料來源：交通部運輸研究所^[15]、本研究整理。

圖 6 公路計算平均崩塌機率示意圖

3.4.2.2 淹水危害度

淹水危害度則採用經濟部水利署於民國 96 年所製作之第二代淹水潛勢^[23]等級來代表。其中現況採用降雨延時 24 小時之 200 年重現期淹水潛勢圖資；未來淹水潛勢由於水利署尚無氣候變遷下全臺淹水潛勢圖資，因此經運研所系列研究^[15]討論，未來重現年 200 年淹水潛勢部分，係採用現況重現年 500 年的淹水潛勢圖。

淹水潛勢等級則區分為 5 等級，分別為低 (0~0.3 公尺)、中低 (大於 0.3 公尺~1 公尺)、中 (大於 1 公尺~2 公尺)、中高 (大於 2 公尺~3 公尺)、高 (大於 3 公尺)，此亦代表危害度等級。

3.5 產製風險地圖

本研究係以地理資訊系統 (GIS) 技術建置整體氣候變遷脆弱度及風險評估系統，透過 GIS 內建 VB.NET 撰寫巨集，將前述研擬之脆弱度及風險評估標準及客製化分析程序，藉由環域分析 (buffer)、交集 (intersect)、融合 (dissolve) 等空間分析功能，進行相關屬性資料計算分析。

鐵公路系統以元件方式進行細部各項屬性資料的計算分析；國道以交流道及每 100 公尺路段為分析元件，快速公路以匝道及每 100 公尺路段為分析元件，省道以每 500 公尺路段為分析元件，臺鐵以車站及每 1 公里路段為分析元件，高鐵以車站及每 100 公尺路段為分析元件。

脆弱度地圖部分，係將系統計算鐵公路各元件之脆弱度指標套疊於鐵公路系統得脆弱

度地圖。坡災危害度地圖係以路段崩塌機率進行危害度分級，淹水危害度地圖係將鐵公路系統分析元件套疊淹水潛勢圖後，進行等級劃分。將危害度及脆弱度以圖 5 之風險矩陣劃分為高、中高、中、中低、低風險等 5 個等級，透過系統的計算及圖資套疊，即得鐵公路系統風險地圖。

四、研究成果

4.1 脆弱度地圖

4.1.1 公路系統

一般省道及快速公路之脆弱度地圖如圖 7、8 所示。現況及未來屬中高以上之脆弱度等級路段，主要分布於六都與新竹縣、嘉義市、嘉義縣、彰化縣、宜蘭縣及臺東市。

國道現況及未來屬中高以上之脆弱度等級路段主要分布於六都，詳見圖 9。

4.1.2 軌道系統

臺鐵不論現況或未來屬中高以上之脆弱度路段，主要分布於六都及其鄰近地區；高鐵中高以上脆弱度之路段，主要分布於桃園市與新竹縣；未來新增新北市與臺中市。

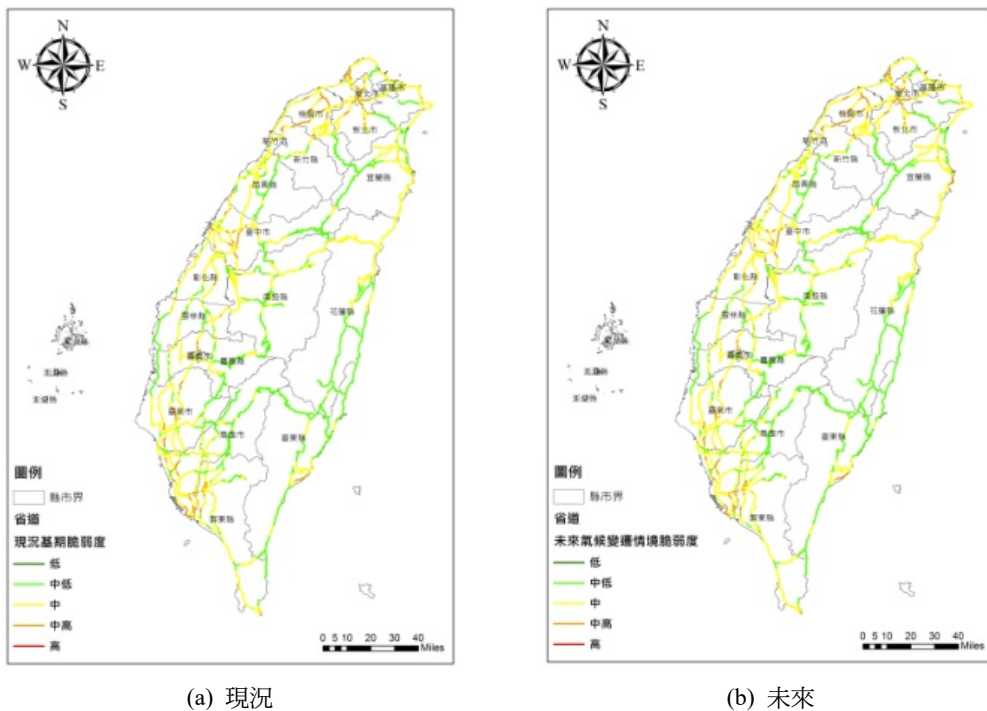
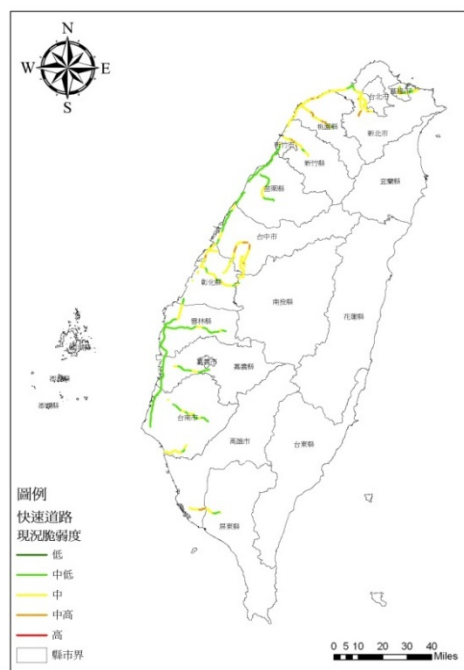
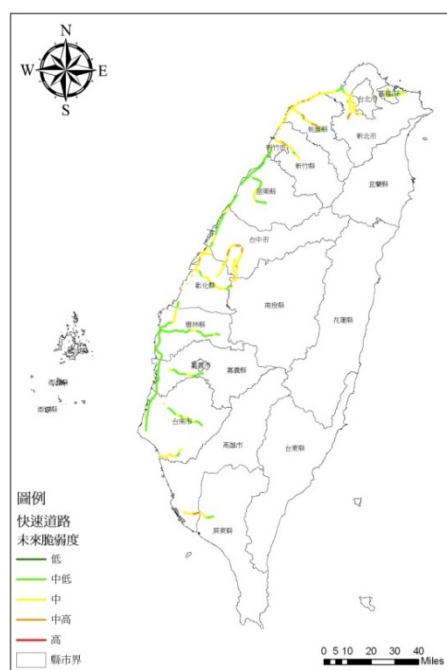


圖 7 一般省道脆弱度地圖



(a) 現況



(b) 未來

圖 8 省道快速公路脆弱度地圖



(a) 現況



(b) 未來

圖 9 國道脆弱度地圖

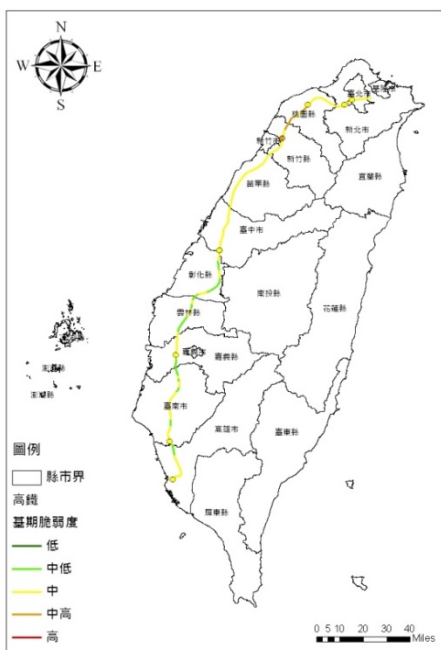


(a) 現況



(b) 未來

圖 10 臺鐵脆弱度地圖



(a) 現況



(b) 未來

圖 11 高鐵脆弱度地圖

4.2 風險地圖⁷

4.2.1 一般省道風險地圖

(一) 坡災風險地圖

一般省道兩情境下之坡災風險地圖如圖 12 所示，中高級以上風險熱點主要分布在山區，總計路段長度約 406 公里（約占一般省道總長度約 4,744 公里之 8.5%），其中熱點集中地區包括臺 7 及臺 7 甲的桃園復興、宜蘭大同地區；臺 8 的臺中和平、南投仁愛、花蓮秀林等地區；臺 9 的宜蘭蘇澳、南澳及花蓮的秀林等地區；臺 14 及臺 14 甲的南投仁愛地區；臺 18 的嘉義阿里山地區；臺 20 的臺東海端、高雄六龜與桃源地區；及臺 21 的南投信義地區。未來氣候變遷情境熱點會較現況情境下新增鄰近路段約 92 公里長。

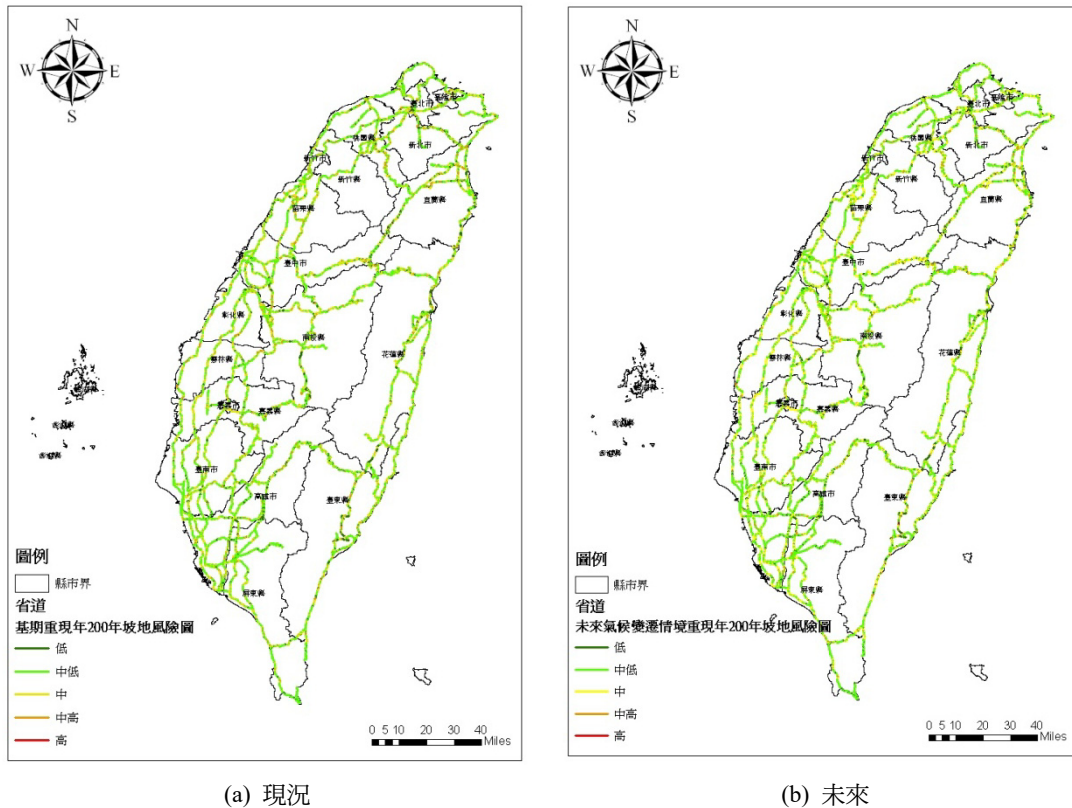


圖 12 一般省道坡災風險地圖

7. 本地圖產製結果亦可至「鐵公路氣候變遷調適資訊平台」查詢，目前提供鐵公路機關參考應用。

(二) 淹水風險地圖

一般省道於兩情境下之淹水風險地圖如圖 13 所示，現況之中高級以上風險熱點主要分布在沿海或山區河岸低窪地區，總計路段約 79 公里；未來氣候變遷情境下淹水風險熱點範圍將會擴大，預計新增約 82 公里的路段。

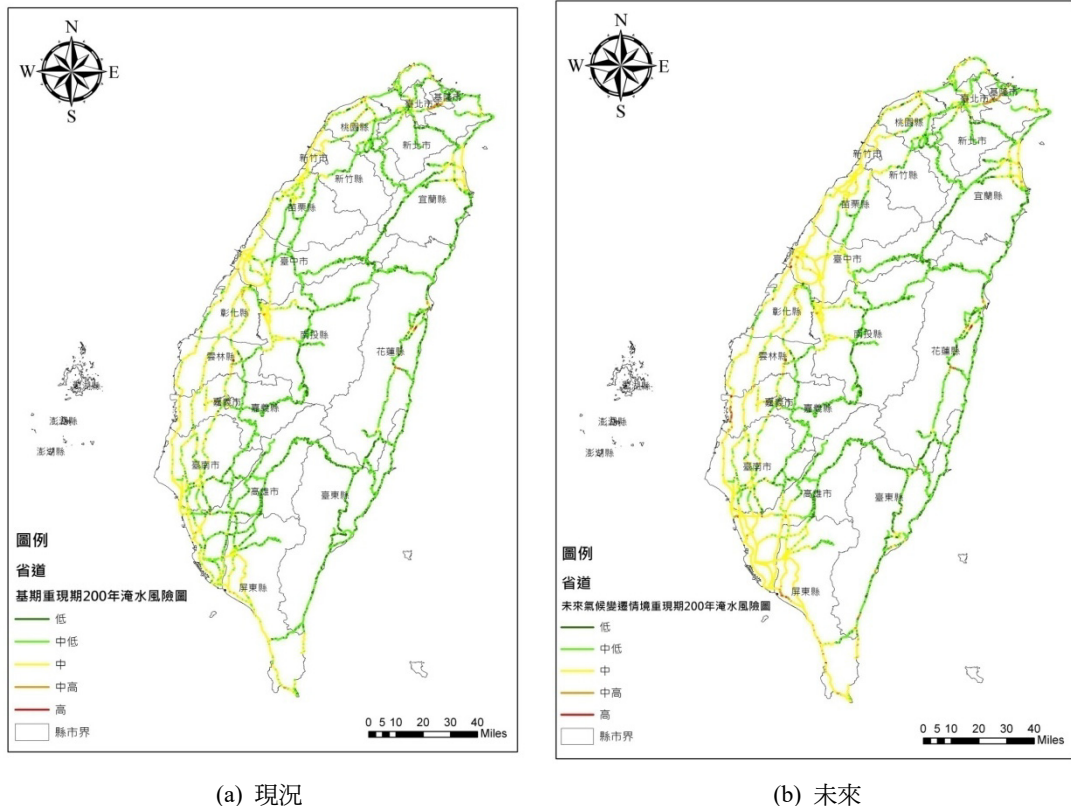


圖 13 一般省道淹水風險地圖

4.2.2 省道快速公路風險地圖

(一) 坡災風險地圖

省道快速公路於兩情境下之坡災風險地圖如圖 14 所示，由於快速公路多位於生活圈主要活動區域，離山區較遠，不論現況及未來，風險中高級以上之熱點僅苗栗後龍路段。

(二) 淹水風險地圖

省道快速公路於兩情境下之淹水風險地圖如圖 15 所示，風險中高以上等級之熱點路段主要集中在西側端點（多已近沿海低窪地區，且為平面路段），現況熱點路段約 6.8 公里（約占省道快速公路總長 776 公里之 0.9%）；未來氣候變遷情境下新增熱點路段 11.4 公里。

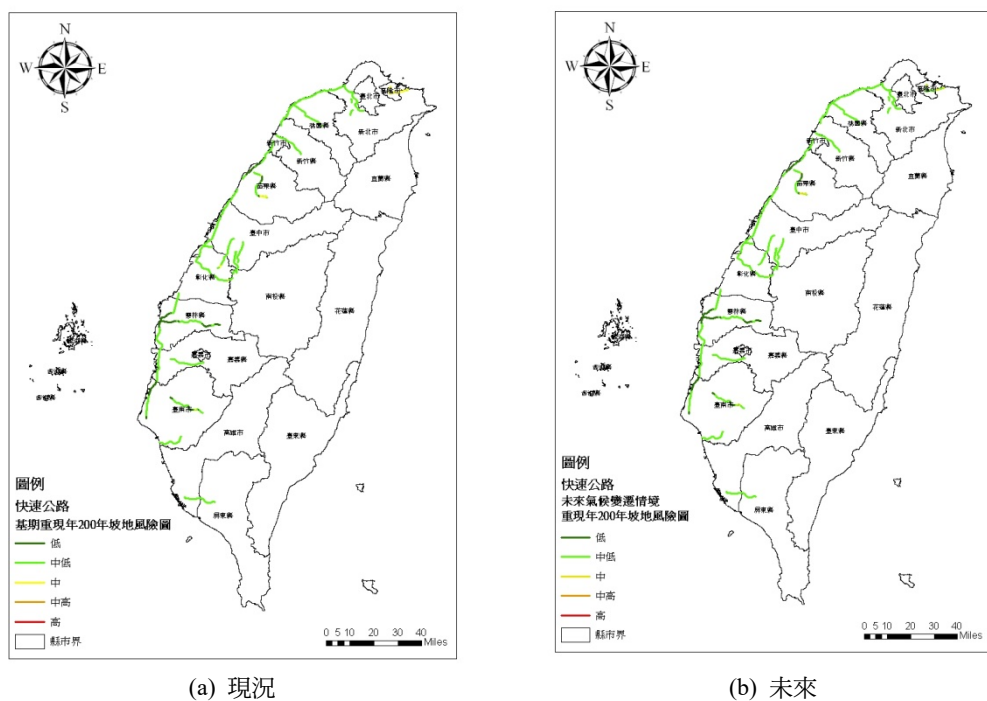


圖 14 快速公路坡災風險地圖

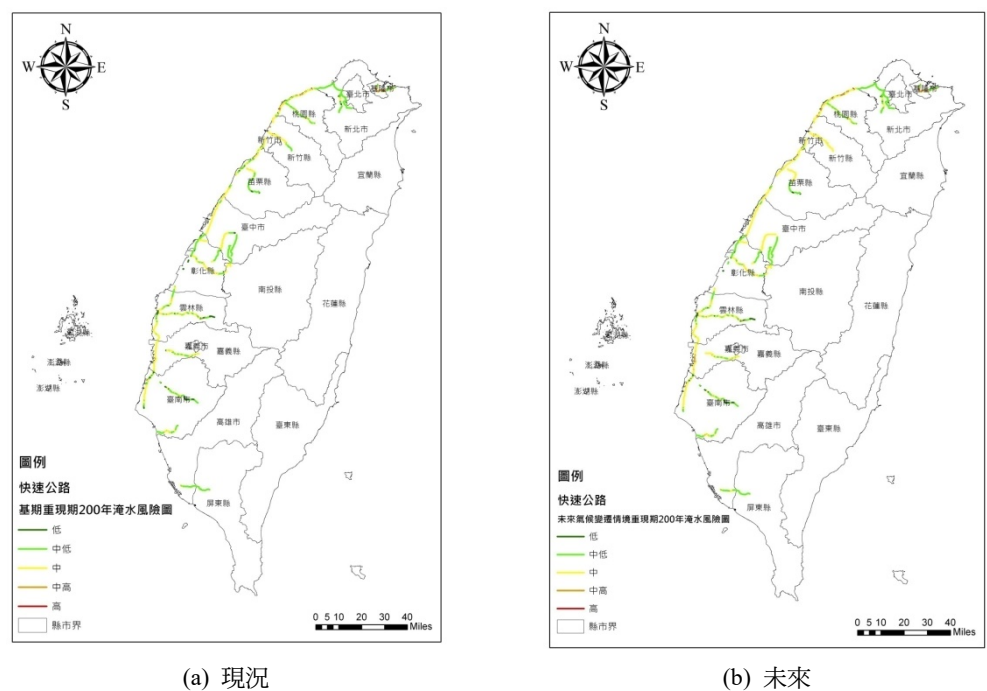


圖 15 快速公路淹水風險地圖

4.2.3 國道風險地圖

(一) 坡災風險地圖

國道兩情境下之坡災風險地圖如圖 16 所示，現況及未來中高級風險以上熱點幾乎相同，主要分布在山區及其鄰近地區，如新北的七堵、汐止、深坑、坪林；新竹的寶山；苗栗的造橋、頭屋；臺中的豐原、霧峰；南投的中寮、草屯；高雄的旗山、燕巢等。

(二) 淹水風險地圖

國道於兩情境下之淹水風險地圖如圖 17 所示，由於高速公路多為高架，現況之中高級風險以上熱點主要集中在交流道，計有基隆交流道等 32 個交流道；未來在氣候變遷情境再新增基隆端等 8 個交流道及局部路段。

4.2.4 臺鐵風險地圖

(一) 坡災風險地圖

臺鐵於兩情境下之坡災風險地圖如圖 18 所示，不論現況及未來，中高級以上之風險熱點分布於北迴線、宜蘭線及南迴線之路段及車站，包含宜蘭、花蓮、臺東及屏東等地區。

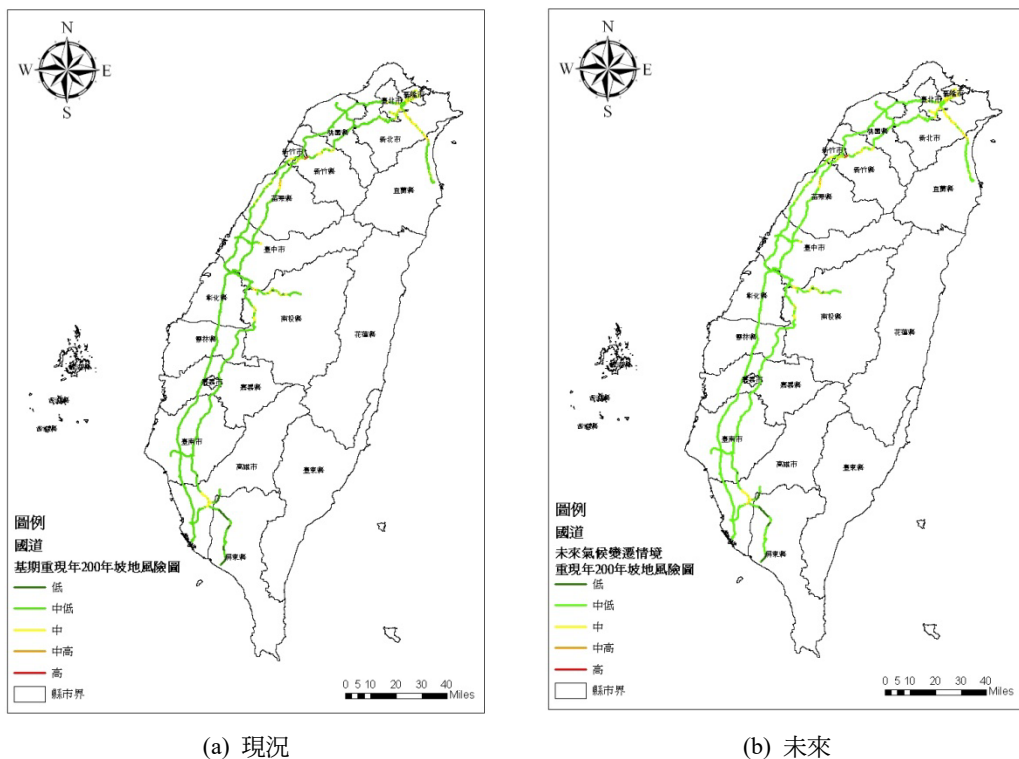


圖 16 國道坡災風險地圖

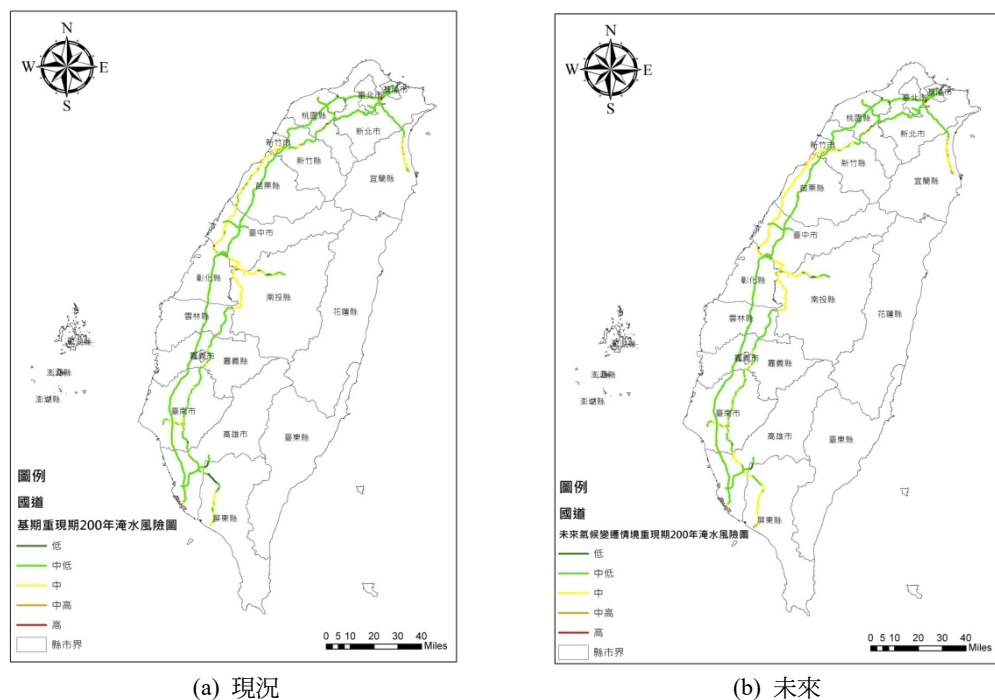


圖 17 國道淹水風險地圖

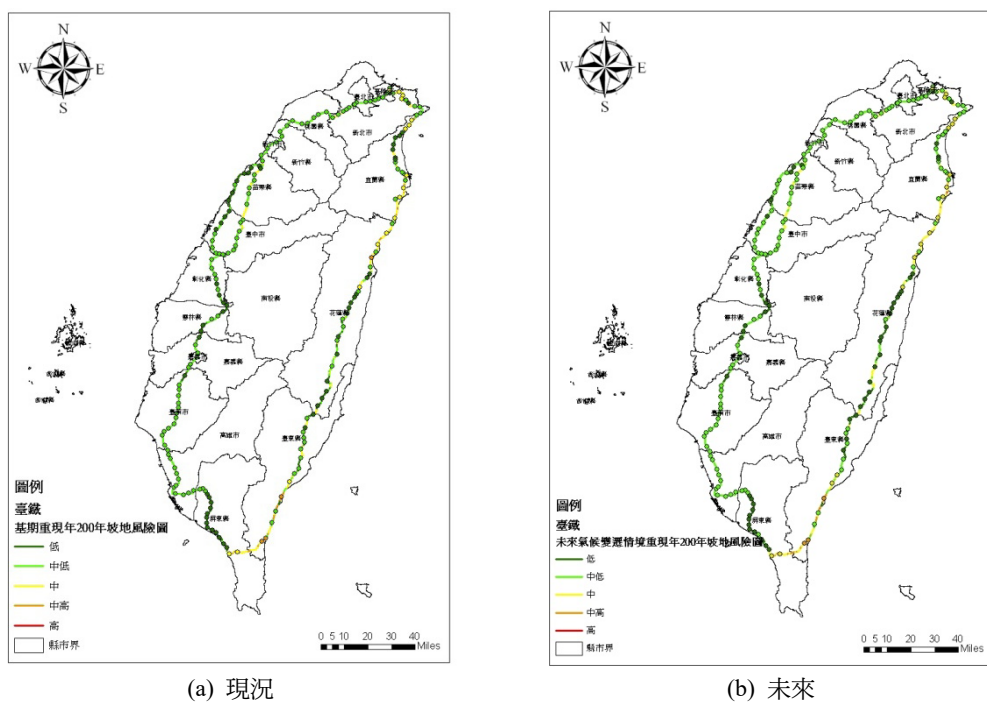


圖 18 臺鐵坡災風險地圖

(二) 淹水風險地圖

臺鐵於兩情境下之淹水風險地圖如圖 19 所示，淹水風險中高級以上熱點，現況分布於西部幹線、北迴線及花東線共計 39 公里的路段，及基隆百福站與新北汐止地區的五堵站、汐止站及汐科站等 4 車站。未來氣候變遷情境新增之熱點除前述外，更擴展至鄰近地區且新增南迴線位於臺東大武、太麻里與臺東市，及屏東林邊與南州等地計 26 公里路段。

4.2.5 高鐵風險地圖

(一) 坡災風險地圖

高鐵於兩情境下之坡災風險地圖如圖 20 所示，風險中高以上等級之熱點路段集中於新竹、苗栗地區，現況計 8.1 公里；未來氣候變遷情境下熱點地區相同但新增 4.5 公里。

(二) 淹水風險地圖

高鐵於兩情境下之淹水風險地圖如圖 21 所示，不論現況或未來氣候變遷情境均無中高等級以上之風險熱點。

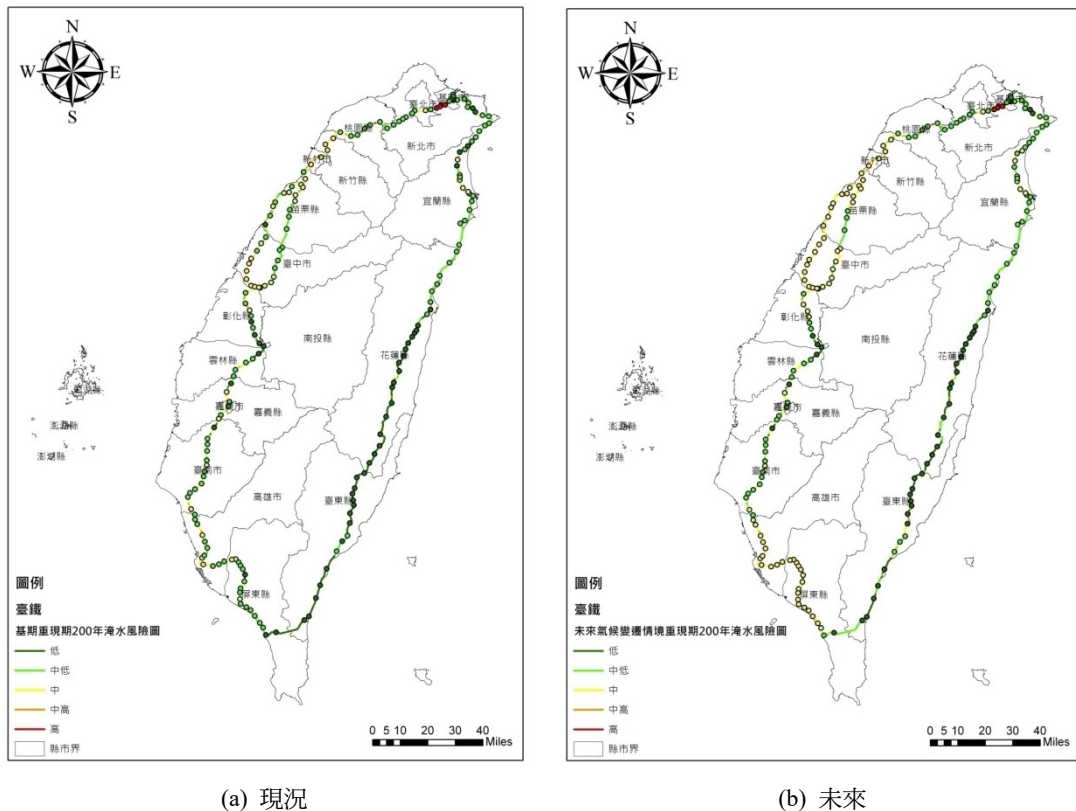


圖 19 臺鐵淹水風險地圖



(a) 現況



(b) 未來

圖 20 高鐵坡災風險地圖



(a) 現況



(b) 未來

圖 21 高鐵淹水風險地圖

4.3 綜合討論

本研究將脆弱度定義為社經影響程度與運輸設施的現有能力的綜合評估結果，在運輸設施現有能力的無重大差別情況下，社經特性即為評估鐵公路系統脆弱度的主要因素。從脆弱度熱點分析可了解，重大鐵公路系統脆弱度熱點多在人口、交通量活動較頻繁的地區，此亦顯現重大鐵公路系統失能對國家社經發展影響最脆弱的地方。

根據 AR5 風險評估的精神，以脆弱度為基礎，進一步將坡災及淹水的危害度納入考量後，可分析鐵公路系統失能的風險。整體而言，坡災風險熱點多在山區鄰近坡地之路段，未來氣候變遷情境下新增坡災熱點並不多，顯示這類災害的風險會隨著未來極端降雨而加重其危害度，但因地域性（山區或鄰近山區）明顯，故新增熱點較少。在淹水風險部分，熱點多在沿海或山區河岸低窪地區，對於國道、快速公路、高鐵這類多數路段為高架型式之運輸系統，交流道及車站的淹水風險不低於路段；未來氣候變遷情境下，因極端降雨，其危害度之程度與範圍皆有增加，導致淹水風險熱點大增。

由於影響風險等級的因素包含了危害度與脆弱度，當危害與脆弱度越高，風險隨之升高；當危害與脆弱度減小，則風險隨之降低。脆弱度又包括社經影響程度與運輸設施現有能力的兩大類指標。其中，後者包括設施結構安全性、監測系統、替代道路等指標，亦可代表運輸設施的調適能力。若某風險熱點具高等級之風險，可透過提升調適能力，如提升結構安全、增進監測能力、完善替代道路等調適作為，來降低其脆弱度及風險。

五、結語

本研究係針對全國性鐵公路系統於氣候變遷的情境下，進行大尺度的風險熱點分析。透過系統性、客觀性的分析方式，考量交通、產值等社經面及運輸設施現有能力的評估系統的脆弱度；另進一步結合坡災與淹水危害度，進行可能的風險程度分析，並繪製出風險地圖，提供鐵公路主管機關參考，可進一步針對熱點分析其災害成因，以利研析有效之調適作為。

現階段受限於資料取得問題，僅以 5 個脆弱度指標來計算綜合脆弱度，考量受強降雨影響之坡地與淹水災害，利用水利署淹水潛勢及中央地質調查所地質災害潛勢等圖資及崩塌機率模式之應用，定義危害度，以評估風險。脆弱度指標及危害度之定義與計算仍有改善精進的空間，目前運研所仍持續研究中。

參考文獻

1. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *IPCC Fourth Assessment Report (AR4)—Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, 2007。

2. 交通部運輸研究所，交通設施因應氣候變遷之脆弱度評估作業探討，民國 102 年。
3. United Nations Environment Programme (UNEP), “Vulnerability and Impact Assessments for Adaptation to Climate Change (VIA Module)”, *IEA Training Manual*, Vol.2, 2009.
4. Lee, D. K., Jung, H. C., Kim, H. G., Song, C. K., and Yu, J. A., “The Vulnerability Assessment for Local Adaptation to Climate Change in Korea”, the 17th AIM International Workshop, Japan, 2012.
5. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *IPCC Fifth Assessment Report (AR5)—Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, 2014.
6. United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR), *Living with Risk: A Global Review of Disaster Reduction Initiatives*, United Nations, Geneva, 2004.
7. Villagrán De León, J. C., “Vulnerability: A Conceptual and Methodological Review”, Publication Series of UNU-EHS, N4, 2006.
8. Webb, P. and Harinarayan, A., “A Measure of Uncertainty: The Nature of Vulnerability and Its Relationship to Malnutrition”, *Disasters*, Vol. 23, 1999, pp. 292-305.
9. Dille, M., Chen, R., Deichmann, U., Lerner-Lam, A., and Arnold, M., *Natural Disaster Hotspots: A Global Risk Analysis*, World Bank, Washington, DC, 2005.
10. Hahn, H., “Indicators and Other Instruments for Local Risk Management for Communities and Local Governments”, Document Prepared as Part of the Documents Related to the Project: Local Risk Management For Communities And Local Governments, German Technical Cooperation Agency, GTZ, IADB, 2003.
11. 國家發展委員會，國家氣候變遷調適行動計畫—維生基礎設施領域行動方案(102~106年)，民國 103 年。
12. 行政院農業委員會，氣候變遷對灌溉系統之衝擊與脆弱度評估方法之建立，民國 99 年。
13. 國家發展委員會，地方氣候變遷調適計畫規劃作業指引，民國 101 年。
14. 交通部運輸研究所，重大鐵公路系統氣候變遷調適策略與脆弱度評估指標之研究，民國 104 年。
15. 交通部運輸研究所，重大鐵公路系統氣候變遷風險評估機制與調適資訊平台之研究(1/2)，民國 105 年。
16. 經濟部水利署，脆弱度及風險地圖分析方法之研究，民國 99 年。
17. 行政院農業委員會林務局，建立氣候變遷對生物多樣性風險與脆弱度評估模式及因應策略規劃期末成果報告，民國 102 年。
18. 黃宗煌，「能源部門因應氣候變遷調適策略研析計畫」，財團法人臺灣綜合研究院，民國 101 年。
19. 科技部國家災害防救科技中心，氣候變遷衝擊下災害風險地圖，民國 103 年。
20. 經濟部水利署水利規劃試驗所，高屏流域因應氣候變遷防洪及土砂更新研究計畫，民國 102 年。
21. 科技部國家災害防救科技中心，「臺灣氣候變遷推估與資訊平台 (Taiwan Climate Change Projection and Information Platform Project, TCCIP)」，<http://tccip.ncdr.nat.gov.tw/v2/index.aspx>，民國 104 年。
22. 交通部運輸研究所，第 5 期整體運輸規劃研究系列—城際運輸需求模式檢討及參數更

新研究(3/3)，民國 103 年。

23. 經濟部水利署，「防災資訊服務網」，http://fhy.wra.gov.tw/Pub_Web_2011/Page/Frame_MenuLeft.aspx?sid=27，民國 104 年。